

SIMULATION DES CHAMPS ELECTRIQUES D'UN MOTEUR SYNCHRONES DE TRACTION— VALIDATION PAR L'EXPERIMENTATION DES SEUILS D'APPARITION DE DECHARGES PARTIELLES SELON LA TEMPERATURE

Florian LOUBEAU^{1,2,3}, Anne DURIEUX³, Jean-Luc POITRINET³, François FRESNET³, Florence LE-STRAT³, Pascal RAIN^{1,2}

1: Univ. Grenoble Alpes, G2Elab, F-38000 Grenoble, 2: CNRS, G2Elab, F-38000 Grenoble, 3: Renault SA

RESUME - La simulation des champs électriques est un outil de plus en plus utilisé afin d'estimer le risque de voir apparaître ou non des décharges partielles dans les moteurs électriques de traction. Deux modélisations ont été effectuées. Une première simule les champs électriques maximaux obtenus entre fils de cuivre nus. Elle permet une première estimation des risques avant l'application des matériaux isolants. La seconde simule les champs électriques de configurations types de moteurs en fonction de la température. Le logiciel Comsol® est exploité et combiné avec l'utilisation de la loi de Paschen modifiée par Dunbar. Cette modélisation permet d'obtenir des résultats très proches des mesures sur motorettes (Norme IEEE 117 1974) et ainsi d'évaluer les risques sur ces supports.

Mots-clés— Moteurs électriques, automobile, décharges partielles, isolation, simulation

1. INTRODUCTION

Pour la validation du système d'isolation électrique (SIE) de ses moteurs électriques, Renault s'appuie de plus en plus sur la simulation des champs électriques pour estimer le risque de voir apparaître ou non des décharges partielles (DP).

Les deux objectifs visés ici sont la simulation de champs électriques de différentes configurations « types », dans un moteur synchrone, et leur comparaison avec la courbe de Paschen. Des premières simulations sur des fils de cuivre nus ont été réalisées afin d'avoir une évaluation des risques en absence d'isolation. Des simulations tenant compte du système d'isolation et des dimensions des maquettes (les « motorettes ») ont également été effectuées. Celles-ci permettent une estimation des Tensions d'Apparition des Décharges Partielles (TADP) pour des configurations « types » d'un moteur.

2. DESCRIPTION DE LA MOTORETTE

La motorette est une maquette décrite dans la norme IEEE 117-1974. Elle est utilisée dans la procédure d'évaluation des systèmes de matériaux isolants de moteur électrique à bobinage aléatoire alimenté en courant alternatif. Elle est composée de deux ensembles de deux bobines séparés par un papier isolant

(Figure 1). Pour notre cas, le fil émaillé a un diamètre sur cuivre de 1,25 mm et une épaisseur d'émail de 40 µm (fil de grade 2). Le papier isolant a quant à lui une épaisseur de 310 µm. L'ensemble peut être ensuite imprégné par une résine ou un vernis. Deux familles de résines ont été utilisées dans cette étude : une résine époxy à base de DGEBA (DiGlycidyl Ether de Bisphénol A) et est une résine polyesterimide.

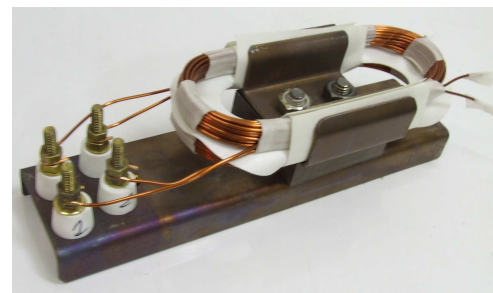


Fig.1 Motorette fabriquée selon la norme IEEE 117-1974

3. SIMULATIONS DE CHAMPS ELECTRIQUES MAXIMAUX

3.1. Protocole de simulations

Le champ électrique maximal entre deux fils parallèles, de rayons R et distants de a, est donné par Harper et O-Dwyer [1] (Equation 1).

Équation 1

$$E_{\text{max}} = \frac{V_0}{a} * \sinh\left(\frac{V_0/(2C)}{V_0/(2C)}\right)$$

$$\text{Avec } C \text{ tel que : } \frac{a}{R} = 4 \sinh^2[V_0/(4C)]$$

Utilisant cette équation, différents champs électriques maximaux pour deux configurations données de moteur ont été simulés :

- entre spires au sein d'une encoche (tension V_0 fixée à 650 V),
- entre torons (ensemble de spires d'une même phase) en sortie d'encoche (tension V_0 fixée à 1300 V).

3.2. Résultats

Par comparaison avec la courbe de Paschen [2], il est montré que la distance entre fils de cuivre nus de 1,25 mm de diamètre doit être inférieure à 52 μm pour permettre l'apparition de décharges partielles (Figure 2).

L'apparition de décharges partielles en-dessous de cette valeur est donc possible. Cependant, l'épaisseur d'émail étant d'environ 40 μm sur le rayon, soit une distance séparant les deux fils de cuivre de 80 μm , cette configuration annule tout risque d'avoir des décharges partielles.

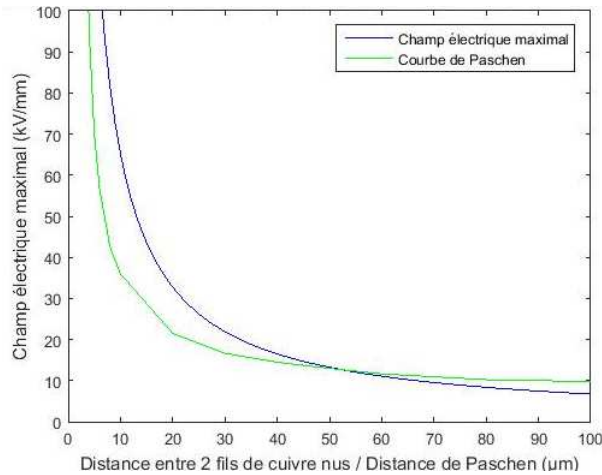


Fig.2 Comparaison du champ électrique maximal entre spires avec la courbe de Paschen

Concernant la simulation du champ maximal entre torons, si la distance entre deux torons de cuivre est inférieure à 142 μm , le champ électrique maximal est supérieur à la tension disruptive de Paschen. L'apparition de décharges partielles en-dessous de cette valeur est donc possible. Cependant, la distance entre deux torons est toujours très supérieure à celle-ci. Même en considérant que des fils en vis-à-vis présentent chacun un défaut d'isolation, il n'y a pas de risque a priori d'avoir des décharges partielles dans l'air à cet endroit.

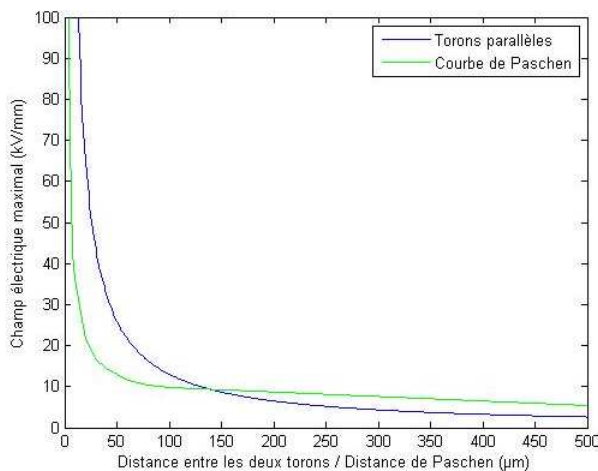


Fig.3 Comparaison des champs électriques maximaux pour 2 torons parallèles avec la courbe de Paschen

4. METHODES DE SIMULATION ET PARAMETRES EXPERIMENTAUX DE MESURES

4.1. Simulations des champs électriques

La modélisation d'une motorette non imprégnée a été effectuée utilisant le logiciel Comsol Multiphysics®. Le modèle se compose de deux fois 5 rangées de 6 spires, séparées et entourées par du papier isolant. Des simulations du champ électrique entre spires et entre phase et masse ont été réalisées pour une tension appliquée de 1 V (Figure 4). Le champ électrique en fonction de l'espacement entre les spires est obtenu. La tension appliquée est ensuite augmentée jusqu'à ce que la courbe du champ électrique croise celle de la loi de Paschen.

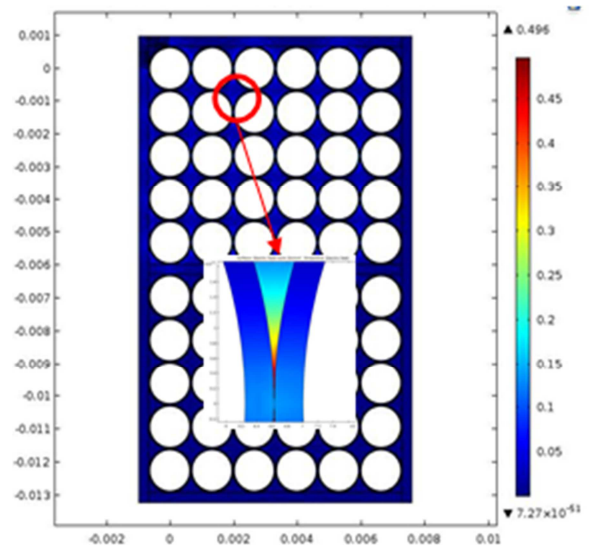


Fig.4 Modélisation de la motorette non-imprégnée

Pour ces simulations, les permittivités diélectriques relatives (ϵ_r) de l'émail et du papier ont été mesurées ; elles sont données dans le tableau 1. A noter que les mesures ont été réalisées jusqu'à 150°C et que la valeur à 180°C est considérée égale à la valeur à 150°C.

Tableau 1 Valeurs de permittivités diélectriques relatives utilisées pour les simulations

| ϵ_r | 20°C | 50°C | 90°C | 120°C | 150°C | 180°C |
|--------------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Email | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 3.5 |
| Papier | 3.8 | 3.9 | 3.8 | 4.3 | 4.4 | 4.4 |

4.2. Simulation de la courbe de Paschen

Afin de déterminer la TADP pour chaque température, la comparaison a été faite entre le champ électrique obtenu et la loi de Paschen modifiée par Dunbar [3,4]. Cette modification permet de prendre en compte les effets de la température et de la pression (Equation 2). Elle est basée sur la loi de Gay-Lussac.

Equation 2

$$E_c = \frac{B \cdot p \cdot \left(\frac{293}{T+273} \right)}{C + \ln \left(A \cdot p \cdot d \cdot \left(\frac{293}{T+273} \right) \right)} \quad \text{avec} \quad C = \ln \left[\frac{1}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right]$$

Avec:

- E_c , le champ électrique, V/m
- A , un coefficient propre au gaz, 1,5 $\text{torr}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ dans l'air à température ambiante

- B, un coefficient propre au gaz, $36,5 \text{ V.torr}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ dans l'air à température ambiante
- d, l'espacement d'air, mm
- p, la pression, torr
- T, la température, °C
- γ , le second coefficient de Townsend, 4.10^{-4} .

Ce dernier coefficient a été déterminé par des mesures au sein du laboratoire de R&D de Renault.

4.3. Système de mesure de la TADP

Afin de minimiser les bruits parasites lors des mesures de décharges partielles, différents dispositifs ont été utilisés (Figure 5): un générateur de tension associé à un amplificateur de puissance au lieu d'un autotransformateur directement connecté au réseau, un filtre ainsi qu'un diviseur capacitif. De plus, toute la partie haute-tension du dispositif est située à l'intérieur d'une cage de Faraday.

La mesure des DP se fait à l'aide d'un système ICM de Power Diagnostix. Le temps mort après chaque DP est ajusté à $20 \mu\text{s}$. Le système de détection est calibré à l'aide d'un calibre à 50 pC . Afin de limiter le bruit de mesure, la limite basse de détection est fixée à 6 % de la valeur maximale de l'échelle. Dans le but d'éviter tout endommagement des différents systèmes de mesures du fait d'un claquage électrique d'un échantillon, un détecteur de courant par boucle est placé entre l'échantillon et le préamplificateur de DP. L'objectif est de couper le générateur en cas de d'une surintensité due au claquage.

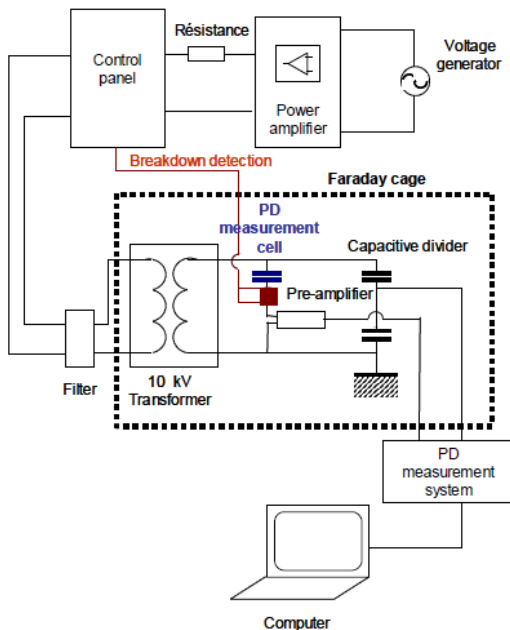


Fig.5 Schéma du dispositif expérimental de mesure des décharges partielles

Sur les motorettes, les mesures de tension d'apparition des décharges partielles (TADP) sont réalisées entre spires, entre phase et masse (i.e. entre une paire de bobines et la partie métallique) et entre phases (i.e. entre les 2 paires de bobines). Le critère de détection de la TADP est à minima une répétition de 2 DP/s.

5. RESULTATS

5.1. Résultats entre spires de motorettes non imprégnées

Les résultats de la simulation montrent pour la motorette non-imprégnée une diminution de la TADP d'environ 15 % entre 20°C et 180°C . Une comparaison entre les simulations et les résultats expérimentaux a été réalisée (Figure 6). Ces derniers sont issus de mesures faites sur motorette et ont une incertitude de 5 %.

L'écart maximal entre les deux courbes est d'environ 6 % montrant ainsi la bonne corrélation entre les mesures expérimentales et les résultats des simulations.

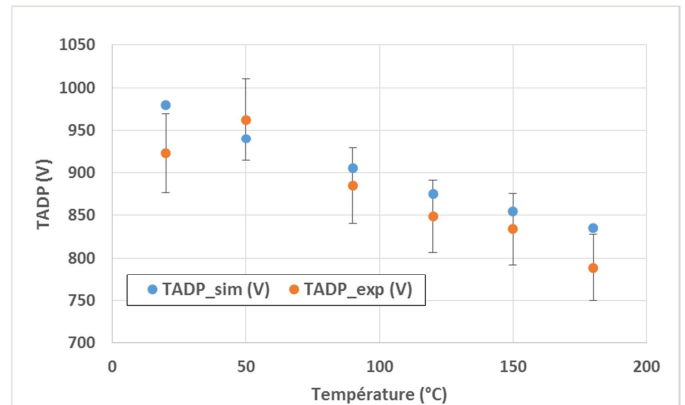


Fig.6 Evolution en température de la TADP entre spires – Comparaison entre simulations et résultats expérimentaux

Une légère augmentation de la TADP est observée pour les mesures expérimentales entre 20°C et 50°C . Elle n'est pas présente sur la simulation. Ceci est attribué à un séchage partiel de la motorette.

La Figure 7 montre la comparaison entre le champ électrique simulé et la loi de Paschen à 20°C . Comme il est possible de le voir, le croisement entre les deux courbes ne se fait pas au maximum du champ électrique, c'est-à-dire que la décharge n'a pas lieu dans la zone où le champ est maximal. Pour notre cas, l'espacement d'air pour lequel des décharges partielles apparaissent est de $35 \mu\text{m}$. Cet espacement est situé à une distance de $150 \mu\text{m}$ du point de contact des spires.

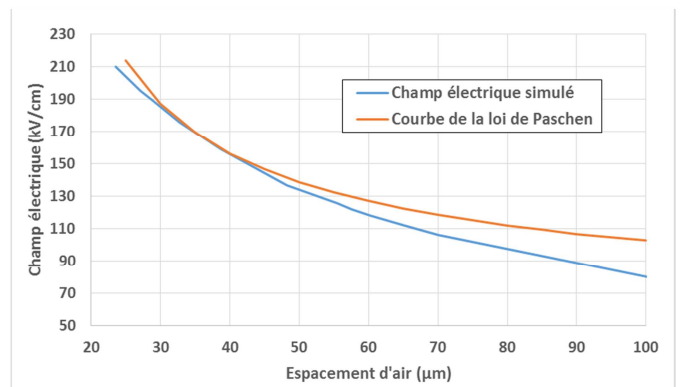


Fig.7 Evolution en température de la TADP entre spires – Comparaison entre résultats expérimentaux et simulés

5.2. Résultats entre phase et masse de motorettes non imprégnées

Les résultats de la simulation montrent pour la motorette non-imprégnée une diminution de la TADP d'environ 25 % entre 20°C et 180°C. Une comparaison entre les simulations et les résultats expérimentaux a été réalisée (Figure 8). Ces derniers sont également issus de mesures faites sur motorettes et ont une incertitude de 5 %.

L'écart maximal entre les deux courbes varie entre 6 % et 12 % montrant ainsi la bonne corrélation entre les mesures expérimentales et les résultats des simulations.

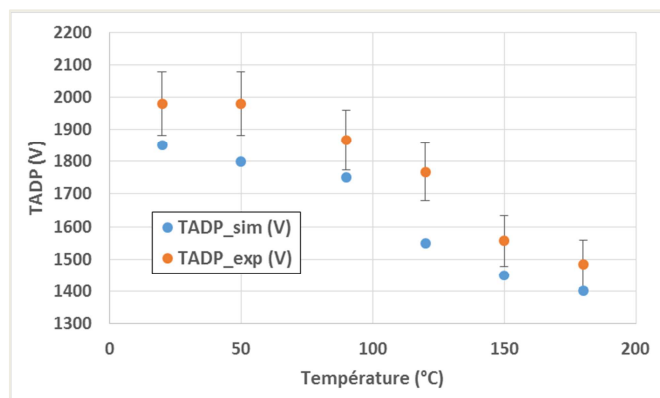


Fig.8 Evolution en température de la TADP entre phase et masse – Comparaison entre simulations et résultats expérimentaux

Pour cette modélisation également, la modification de Dunbar sur la loi de Paschen permet une bonne estimation de la TADP en accord avec les variations de température.

5.3. Résultats entre spires de motorettes imprégnées

Des mesures de TADP entre spires sur motorettes imprégnées ont également été réalisées en température.

Concernant la motorette imprégnée par la résine époxy, les résultats montrent une augmentation de la TADP de 17 % à 20°C en comparaison avec une motorette non imprégnée. Les mesures en température indiquent une diminution de la TADP de 22 % entre 20°C et 180°C (Figure 9).

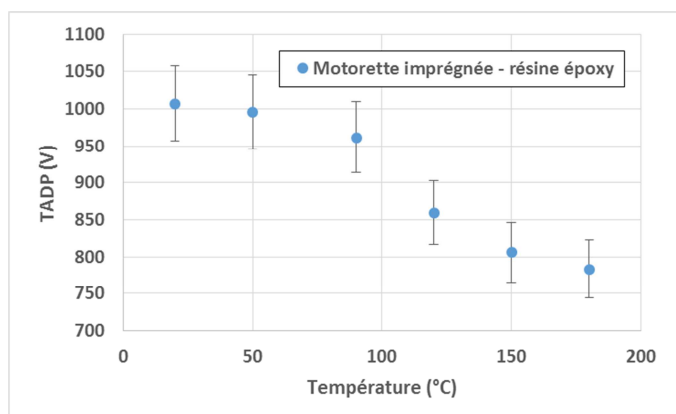


Fig.9 Evolution en température de la TADP entre spires pour une motorette imprégnée par de la résine époxy

Concernant la motorette imprégnée par la résine polyesterimide, les résultats montrent une augmentation de la TADP de 13 % à 20°C en comparaison avec une motorette non imprégnée. Les mesures en température indiquent une diminution de la TADP de 24 % sur la plage 20°C - 180°C (Figure 10).

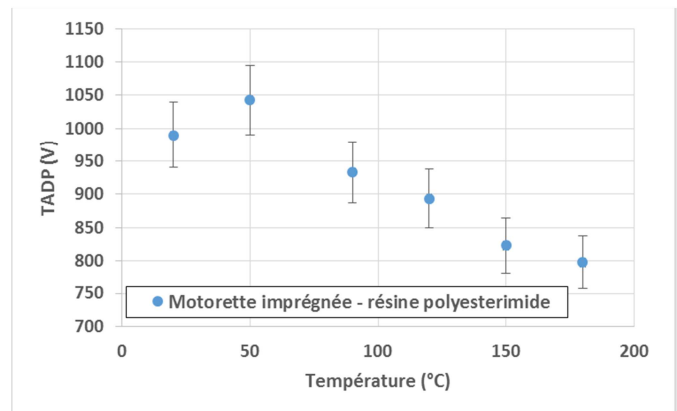


Fig.10 Evolution en température de la TADP entre spires pour une motorette imprégnée par de la résine polyesterimide

6. CONCLUSIONS

Concernant les simulations des champs électriques maximaux sur les fils de cuivre nus, ceux-ci indiquent qu'à l'état initial, sans vieillissement, il n'y a pas de risque de DP du fait de la présence d'épaisseur d'émail suffisante, même dans le cas où deux défauts d'isolation seraient en vis-à-vis.

Les simulations de la TADP pour des configurations entre spires et entre phase et masse, sont bien corrélées aux mesures effectuées.

L'effet de la température sur la TADP est bien simulé par la correction de Dunbar sur la loi de Paschen comme l'atteste la bonne corrélation avec les mesures. Les résultats montrent une forte baisse entre 15 et 25 % de la TADP entre 20°C et 180°C.

L'effet de la résine d'imprégnation vis-à-vis de la TADP a également pu être quantifié, avec une augmentation de celle-ci de 13 % à 17 % après imprégnation. Les mesures en température montrent une diminution de la TADP d'un minimum de 22 % entre 20°C et 180°C.

7. REFERENCES

- [1] P. G. Harper et J. J. O'Dwyer, « Electric field strength between crossed and parallel circular cylinders », Monograph n°235, Mai 1957.
- [2] T. W. Dakin, G. Luxa, G. Oppermann, J. Vigreux, G. Wind, H. Winkelkemper, « Breakdown of gases in uniform fields Paschen curves for nitrogen, air and sulfur hexafluoride », Electra n°32, p61-82, 1974.
- [3] W. G. Dunbar, J. W. Seabrook, « High voltage design guide for airborne equipment », Boeing company document, 1976.
- [4] F. Koliatène, « Contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique », Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, 2009.